

2. Yerokhov, V. Yu. Porous silicon in solar cell structures: A review of achievements and modern directions of further use [Text] / V. Yu. Yerokhov, I. I. Melnyk // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 1999. – Vol. 3, Issue 4. – P. 291–322. doi: 10.1016/s1364-0321(99)00005-2
3. Ou, W. Optical and electrical properties of porous silicon layer formed on the textured surface by electrochemical etching [Text] / W. Ou, L. Zhao, H. Diao, J. Zhang // Journal of Semiconductors. – 2011. – Vol. 32, Issue 5. – P. 056002. doi: 10.1088/1674-4926/32/5/056002
4. Huang, Y. M. Porous silicon based solar cells [Text] / Y. M. Huang, Q.-L. Ma, M. Meng // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 663-665. – P. 836–839. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.663-665.836
5. Zhang, X. G. Electrochemistry of Silicon and Its Oxides [Text] / X. G. Zhang. – Kluwer Academic, Horwell, MA, 2001. – 537 p.
6. Salman, K. A. The effect of etching time of porous silicon on solar cell performance [Text] / K. A. Salman, K. Omar, Z. Hassan // Superlattices and Microstructures. – 2011 – Vol. 50, Issue 6. – P. 647–658. doi: 10.1016/j.spmi.2011.09.006
7. Патент № 36642. Україна, МКВ Н 01 L 31/05. Спосіб одержання поверхневої мультитекстури [Текст] / Єрохов В. Ю., Селемонавічус А. А. – НУ “Львівська політехніка”. – заявка № а 2007 13213 від 27.11.2007. Рішення на видачу патенту України на винахід від 10.11.2008. – Бюл. № 21.
8. Foil, H., Formation and application of porous silicon [Text] / H. Foil, M. Christophersen, J. Carstensen, G. Hasse // Materials Science and Engineering R. – 2002. – Vol. 39. – P. 93–141.
9. Yerokhov, V. Development of profitable Methods of Texturing for Silicon Solar Cells [Text] / V. Yerokhov, R. Hezel, H. Nagel, I. Melnyk, I. Semochko // 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – Glasgow, UK, 2000. – № VA2-15.
10. Патент № 92962, Україна, МКВ Н 01 L 31/05. Спосіб одержання поверхневої функціональної нанотекстури [Текст] / Єрохов В. Ю., Дружинін А. О. – Національний Університет “Львівська політехніка”, Рішення на видачу патенту України на винахід від 27.12.2010 р. – Бюл. № 24.

Запропоновано спосіб визначення стабільності процесу розмірної обробки дугою. Наведено залежності, за якими визначається приналежність миттєвих значень напруги дуги до зон горіння дуги. За значеннями отриманих коефіцієнтів можна судити про стан процесу і, відповідно, керувати ним, що створює широкі можливості по автоматизації керування станом процесу розмірної обробки дугою

Ключові слова: напруга дуги, зони горіння дуги, стабільність процесу, розмірна обробка дугою

Предложен способ определения стабильности процесса размерной обработки дугой. Приведены зависимости, по которым определяется принадлежность мгновенных значений напряжения дуги к зонам горения дуги. По значениям полученных коэффициентов можно судить о состоянии процесса и, соответственно, управлять им, что создает широкие возможности по автоматизации управления состоянием процесса размерной обработки дугой

Ключевые слова: напряжение дуги, зоны горения дуги, стабильность процесса, размерная обработка дугой

УДК 621.9.048.4:681.511.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36226

СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ПРОЦЕСУ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ ДУГОЮ

Г. В. Савеленко

Асистент

Кафедра економіки та організації виробництва
Кіровоградський національний
технічний університет
пр. Університетський, 8,
м. Кіровоград, Україна, 25000
E-mail: savelenko@mail.ru

1. Вступ

Для того, щоб відбувся процес розмірної обробки дугою (РОД), необхідно створити умови для її запалення та існування. РОД хоч і відноситься до різновиду електроерозійної обробки (ЕЕО) струмопровідних матеріалів, проте має суттєві відмінності від традиційних (електроіскрових та електроімпульсних) методів ЕЕО. Процес РОД відбувається при довготривалому горінні електричної дуги в міжелектродному проміжку (МЕП) в поперечному потоці робочої ріди-

ни, яка прокачується під тиском 0,5...3 МПа, що дозволяє вводити великі потужності в МЕП (потужність обмежується величиною поперечного перерізу електрод-інструменту) [1].

Одним з основних показників якості процесу ЕЕО є стабільність його горіння [2]. В працях [3–6] розглядається вплив стабільності горіння на: продуктивність процесу РОД, чистоту оброблюваної поверхні електрода-заготовки (ЕЗ), витрати електрода-інструмента (ЕІ) та її залежність від динамічного тиску робочої рідини і електричної потужності, що підводяться в

МЕП. Також на стабільність процесу РОД впливає матеріал і форма ЕІ та ЕЗ, склад і температура робочої рідини та інші фактори.

На даний час не існує єдиного загальноприйнятого поняття стабільності процесу РОД. Кожен дослідник стабільність процесу РОД розуміє по своєму і тому характеризує її за допомогою різних показників. При цьому плутанину в даному питанні додають такі поняття, як: стаціонарність, сталість, стійкість, стабільність та інші, за допомогою яких дослідники описують процес РОД. Автор вважає, що роз'яснення питання щодо стабільності процесу РОД та приведення способу по її визначенню є актуальною задачею, яка зменшить невизначеність в даній проблемі.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

За працею В. Фінкельбурга та Г. Меккера розрізняють стаціонарні та нестаціонарні дуги [7]. Стаціонарна дуга – це дуга з сталими, малозмінними параметрами, які не залежать від часу. Вона горить не перериваючись, а її струм і напруга відмінні від нуля. Нестационарна дуга характеризується тим, що значення напруги і струму дуги періодично зменшуються до нуля.

На практиці отримали застосування як стаціонарні, так і нестаціонарні дуги, що використовуються при зварюванні, плазменій, розмірній, електроіскровій обробці, в дугових сталеплавильних печах та на інших типах виробництва. Застосування стаціонарної або нестаціонарної дуги визначається вибором технології обробки металів.

Термін «сталість» і «стабільність» використовується, коли необхідно уточнити характер стаціонарної або нестаціонарної дуги. Вони вживаються, коли необхідно підтримувати значення параметрів дуги в заданих межах.

При РОД використовуються стаціонарна електрична дуга [8]. Так як нас цікавить характер електричної дуги при РОД, то в подальшому будемо розглядати поняття стабільність і, відповідно, процес стабілізації тільки для стаціонарної дуги. В роботах [9, 10] поняття стабільність і стійкість дуги розглядаються як синоніми, але в сучасній технічній літературі ці терміни, як правило, не є синонімами [11].

Стійким прийнято вважати процес, який повертається у рівноважений стан після будь-яких достатньо малих початкових відхилень, що викликані дією зовнішніх збурень. Цим пояснюється властивість саморегуляції електричного дугового процесу.

Стабільним вважається процес, у якого відхилення параметрів від середнього значення не перевищує заданого рівня на даній вибірці спостереження або розрахунку керуючого впливу.

В [12] стабільним технологічним процесом вважають властивість останнього забезпечувати постійність розподілу ймовірностей значень його параметрів на протязі деякого інтервалу часу без урахування впливу зовнішніх факторів. Як зазначається в [11], мірою стабільності процесу є відхилення його параметрів від середнього значення і в якості міри відхилення дискретного сигналу найчастіше застосовуються дисперсія або коефіцієнт варіації значень струму або напруги дуги.

Найчастіше під стабільністю процесу РОД розуміють стабільність горіння електричної дуги і стабільність електроерозії металу ЕЗ.

Вперше кількісну оцінку стабільності горіння дуги запропонував К. К. Хренов [10], який оцінював стабільність за величиною довжини дуги при її обриві для нерухомо закріпленого електрода. Він встановив, що чим більша довжина дуги при обриві, тим стабільніший процес горіння. Недоліком даного методу є велика відносна похибка вимірювання 15...30 % [13].

В наукових працях в якості міри рівномірності горіння дуги для оцінки її стабільності використовуються статистичні методи. Так, в [14] в якості показника стабільності використовують дисперсію струму дуги, а у [15, 16] – середньоквадратичне відхилення струму дуги. В [9] розглядається можливість визначення процесу стабільності по дисперсії напруги дуги. В [9, 14–16] наводяться способи визначення стабільності дугового процесу зварювальної дуги в середовищі діелектрика, який є подібним до процесу РОД. Так як спосіб РОД винайдений досить недавно, то в наукових працях, як в зарубіжних, так і в вітчизняних виданнях способи визначення стабільності його процесу не висвітлювались. Це обумовлює необхідність проведення досліджень в даному напрямку.

Впровадження сучасних засобів, які вирішують задачу керування подачею ЕІ, неможливе без наявності достовірного способу визначення стабільності процесу РОД. Спосіб визначення стабільності процесу РОД дозволить в реальному часі отримувати дані, за допомогою яких можливо в автоматичному режимі керувати процесом РОД. Основною задачею САК подачі ЕІ є підтримання МЕП в межах, при яких відбувається стабільний процес горіння дуги. Квазіоптимальний процес РОД по продуктивності обробки можливий лише при стабільному процесі горіння дуги і він відбувається, коли швидкість подачі ЕІ приблизно дорівнює швидкості електроерозії ЕЗ, а величина МЕП становить такий проміжок, при якому в дуговому розряді виділяється максимум підведеної електричної потужності.

3. Мета та задачі дослідження

Метою проведення дослідження була розробка та перевірка працездатності способу автоматичного визначення стабільності процесу РОД.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні основні задачі:

1. Визначити характерні зони горіння дуги при РОД.
2. Розробити спосіб визначення параметрів стабільності процесу РОД.

4. Матеріали та методи дослідження стабільності процесу розмірної обробки дугою

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Дослідження проводилися на електроерозійному верстаті типу АМН-1 з електромеханічним приводом подачі ЕІ. Конструктивні особливості верстату опи-

сані в роботах [17, 18]. Результати експериментальних досліджень були отримані за допомогою інформаційно-вимірального комплексу, який описаний в роботі [19].

В якості витратного матеріалу при експериментах використовували: робоча рідина, що складалася з суміші гасу і масла типу “Індустріальне – 12” у співвідношенні 1:1; електрод-інструмент з матеріалу графіт марки МПГ 7; електрод-заготовка з матеріалу марки СтЗсп згідно ДСТУ3760-98. Були введені технологічні обмеження по величині струму в межах від 50 до 100 А і динамічному тиску робочої рідини в торцевому МЕР $P_0=0,01...0,5$ МПа. У всіх проведених дослідках, що висвітлюються в даній статті, використовувалась зворотна полярності електродів («+» на ЕІ, «-» на ЕЗ).

4. 2. Методика визначення характерних зон горіння дуги та параметрів стабільності РОД

Для електроерозійних верстатів падіння напруги в МЕР є основним вхідним параметром системи автоматичного керування (САК) подачі ЕІ, а її вихідним параметром є команда, що змінює швидкість його подачі.

На практиці, на діючих верстатах з гідроприводом визначення зони, в якій горить дуга, покладається на оператора-верстатника, який керуючись своїм досвідом за показами приладів, виконує керування швидкістю подачі ЕІ. Технологічні параметри процесу: струм дуги та динамічний тиск технологічної рідини він визначає, відповідно, за амперметром та манометром. При відповідності технологічних параметрів за вольтметром оператор-верстатник визначає величину зазору між ЕІ та електродом-заготовкою (ЕЗ). За характером зміни напруги дуги оператор визначає стабільність процесу.

З практичного досвіду відомо, що стабільне горіння дуги можливе, коли напруга коливається в межах 15...50 В. Зони нижче 15 В та вище 50 В вважаються зонами нестабільного горіння дуги. [20].

Для визначення зон горіння дуги пропонуємо використати наступний спосіб.

1. Встановлюємо межі зон горіння дуги: зона холостого ходу (миттєве значення напруги дуги більше 50 В), зона стабільного горіння дуги (миттєве значення напруги дуги коливається в межах від 15 до 50 В), зона короткого замикання (миттєве значення напруги дуги менше 15 В). Характерні зони напруги дуги з використанням осцилограми $U_{dugu}=f(t)$ наведені на рис. 1.

2. Виконуємо підрахунок миттєвих значень напруги дуги, що припадають на кожну з вибраних зон за встановлений час вимірювання.

3. Розраховуємо відсоток приналежності миттєвих значень напруги дуги в кожній з трьох визначених зон за розрахунковий період (час вимірювання).

Для визначення приналежності напруги дуги у відсотках до конкретної зони використаємо формули:

$$P_{\text{zone idling}} = \frac{\sum n_{>50 \text{ В}}}{\sum n_i} 100, \quad (1)$$

$$P_{\text{zone stability}} = \frac{\sum n_{15-50 \text{ В}}}{\sum n_i} 100, \quad (2)$$

$$P_{\text{zone short circuit}} = \frac{\sum n_{<15 \text{ В}}}{\sum n_i} 100, \quad (3)$$

де $\sum n_{>50 \text{ В}}$ – кількість точок миттєвого значення напруги, що знаходились в зоні від 50 В і більше за час проходження n_i точок (зона холостого ходу); $\sum n_{15-50 \text{ В}}$ – кількість точок миттєвого значення напруги, що знаходились в зоні 15–50 В за час проходження n_i точок (зона стабільного горіння дуги); $\sum n_{<15 \text{ В}}$ – кількість точок миттєвого значення напруги, що знаходились в зоні менше 15 В за час проходження n_i точок (зона короткого замикання); $\sum n_i$ – кількість точок вибірки миттєвого значення напруги (за час вимірювання).



Рис. 1. Характерні зони напруги дуги

При розрахунку по (1)–(3) повинна виконуватись наступна умова:

$$\sum n_i = \sum n_{>50 \text{ В}} + \sum n_{15-50 \text{ В}} + \sum n_{<15 \text{ В}}. \quad (4)$$

5. Результати досліджень стабільності процесу розмірної обробки дуги

На підставі проведених експериментів було встановлено, що при стабільності процесу більше 95 % характер миттєвих значень напруги дуги матиме вигляд, наведений на рис. 2.

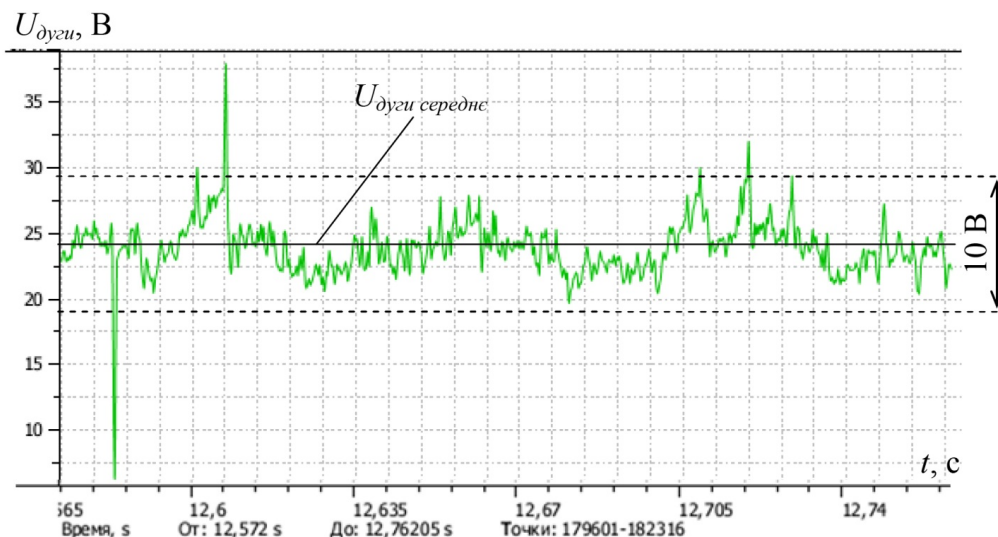


Рис. 2. Осцилограма стабільного процесу РОД

Таким чином, в результаті проведених досліджень нами було визначено, що зменшення амплітуди коливання миттєвого значення напруги за рахунок зміни швидкості подачі ЕІ, призводить до збільшення стабільності процесу РОД і при сталому процесі різниця амплітуди коливань напруги дуги не перевищує 10 В.

6. Обговорення результатів дослідження процесу стабілізації при РОД

Стабілізація процесу горіння дуги в заданих межах відбувається за рахунок керування зміни швидкості подачі ЕІ, за допомогою якої підтримується постійне значення МЕР. В залежності від значення відсотків зон, розрахованих по (1)–(3), визначається знак для збільшення або зменшення швидкості подачі ЕІ на один крок при використанні крокових алгоритмів пошуку квазіоптимального режиму по продуктивності обробки. Значення кроку залежить від матеріалів ЕІ та ЕЗ.

Використовуючи значення коефіцієнтів, що характеризують приналежність миттєвих значень напруги дуги (у відсотках або долях) до кожної з означених зон (рис. 1), можна побудувати закон управління для командного пристрою (мікропроцесорного регулятора), за допомогою якого в автоматичному режимі виконується стабілізація процесу РОД. Підтримка МЕР в межах, при яких відбувається стабільне горіння дуги, тобто при значенні коефіцієнта $P_{zone\ stability} \geq 95\%$, дозволить підтримувати такий режим, при якому потужність, що підводиться в МЕР, буде витрачатись на електроерозію металу без пауз, що виникають при нестабільному режимі роботи РОД ($P_{zone\ stability} < 95\%$).

Для визначення стабільності процесу вибрана початкова зона 15...50 В, яка в декілька разів перевищує зону горіння дуги при стабільному режимі горіння (10В), тому пропонуємо при побудові командного пристрою використовувати двоступінчастий режим стабілізації. На першій ступені широка зона (15...50 В) дозволяє виконати попередню стабілізацію процесу РОД, а на другій ступені з шириною зони 10 В відбувається остаточна стабілізація процесу. Так як на стан процесу РОД впливають: зазор між електродами, швидкість прокачування технологічної рідини, підведена електрична потужність короткої дуги, то зона горіння дуги при стабільному процесі РОД (10 В) може зміщуватись в межах широкої зони. Тому доцільно середину зони стабільного горіння (10 В)

визбирати для кожної ітерації вибірки даних окремо по середньому значенню напруги в цій ітерації. Це дозволить в автоматичному режимі визначати і підтримувати стабільність процесу РОД при зміні факторів, що впливають на процес.

Недоліком запропонованого способу визначення стабільності дуги є недостатня інформативність про процес РОД, оскільки по одній величині напруги на дузі не завжди можна визначити стан протікання процесу. Наприклад, при недостатній величині швидкості прокачування технологічної рідини може виникнути прошарок сажі з продуктів ерозії в МЕР. Даний прошарок буде викликати падіння напруги на дузі, подібне падінню напруги при стабільному процесі РОД, але струм, який буде протікати через МЕР, не викличе електроерозію, а буде тільки збільшувати цей прошарок. Тому при реалізації запропонованого способу на програмно-апаратному пристрої необхідно враховувати і дану особливість та доповнювати командний пристрій каналом струму дуги.

Наступним етапом дослідження є розробка мікропроцесорного регулятора на базі сучасної відладочної плати з LCD-екраном архітектури Cortex-M4 [21] на контролері типу STM32F429ZI, який буде стабілізувати процес РОД в автоматичному режимі.

7. Висновки

Обґрунтований інтервал горіння дуги, в якому можна отримати стабільний процес РОД, і відповідно, забезпечити приріст продуктивності процесу. Запропонований спосіб визначає показники стабільності процесу РОД, по яких пропонується формувати закон управління мікропроцесорного регулятора подачі ЕІ,

що входить до складу САК подачі ЕІ, для забезпечення стабілізації процесу РОД. В САК подачі ЕІ квазіоптимальний режим по продуктивності РОД досягається за рахунок регулювання швидкості подачі ЕІ до значення, рівного швидкості електроерозії. Це дозволяє підтримувати значення проміжку МЕП таким, при якому забезпечується горіння дуги з мінімальними

викидами миттєвого значення напруги дуги, що відповідають значенню напруги дуги при її короткому замиканні або обриві.

Автоматизація процесу подачі ЕІ дозволить підвищити продуктивність процесу РОД та зменшити вимоги до кваліфікації оператора-верстатника і відповідно заощадити кошти на навчання персоналу.

Література

1. Носуленко, В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой. [Текст] / В. И. Носуленко // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 1. – С. 8–17.
2. Гуткин, Б. Г. Автоматизация электроэрозионных станков [Текст] / Б. Г. Гуткин. – Л.: Машиностроение, 1971. – 160 с.
3. Носуленко, В. И. Сталість процесу розмірної обробки металів електричною дугою не профільованим електродом. [Текст] / В. И. Носуленко, О. Ф. Сіса // Збірник наукових праць КНТУ. – 2006. – Вип. 17. – С. 148–153.
4. Боков, В. М. Оброблюваність матеріалів електричною дугою: монографія [Текст] / В. М. Боков, О. Ф. Сіса. – Кіровоград. нац. техн. ун-т. Кіровоград: Імекс, 2013. – 172 с.
5. Собінов, О. Г. Моделювання швидкості знімання матеріалу при технологічному процесі розмірної обробки дугою [Текст] / О. Г. Собінов // Збірник наукових праць КНТУ. – 2006. – Вип. 17. – С. 247–252.
6. Савеленко, Г. В. Обоснование алгоритма работы экстремального регулятора подачи электрода-инструмента на станках размерной обработки дугой. [Текст] : матер. I межд. заоч. науч.-прак. конф. / Автоматизированное проектирование в машиностроении. НОЦ«МС». – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2013. – С. 115–122.
7. Финкельбург, В. Электрические дуги и термическая плазма [Текст] / В. Финкельбург, Г. Меккер. – М.: Изд-во иностр. литер., 1961. – 371 с.
8. Носуленко, В. И. О физической природе, об общем и отличиях, технологических возможностях электрических разрядов и классификации способов электроразрядной обработки металлов [Текст] / В. И. Носуленко // Электронная обработка материалов. – 2006. – № 1. – С. 4–14.
9. Походня, И. К. Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов [Текст]. / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличено и др.; под ред. И. К. Походни. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 224 с.
10. Хренов, К. К. Электрическая сварочная дуга [Текст] / К. К. Хренов. – М.; Киев: Машгиз, 1949. – 204 с.
11. Ланкин, Ю. Н. Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящим электродом [Текст] / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 7–15.
12. Орлов, А. И. Математика случая: Вероятность и статистика – основные факты [Текст]: уч. пос. / А. И. Орлов. – М.: МЗ-Пресс, 2004. – 110 с.
13. Шафранский, Л. Г. Оценка устойчивости дуги переменного тока [Текст] / Л. Г. Шафранский, Л. Н. Орлов, А. В. Абрашин // Автоматическая сварка. – 1972. – № 4. – С. 18–19.
14. Метод оценки стабильности горения дуги. Патент 2063316 Рос. Федерация: МПК В 23 К 31/12, В 23 К 9/073 [Текст] / Язовских В. М., Беленький В. Я., Кривоносова Е. А. и др. – заявитель и патентообладатель Пермский гос. техн. ун-т. – №94037567/08; заявл. 07.10.1994; опубл. 10.07.1996
15. Yazovskikh, V. M. Estimation of the welding electrodes quality by the computer analyses of oscillograms of welding current and voltage [Text] : Proc. Of the 8th Intern. conf. / V. M. Yazovskikh, V. I. Shumyakov, V. N. Boronenkov // Computer technology in welding, 1998. – 10 p.
16. Язовских, В. М. Методика оценки стабильности горения сварочной дуги тока [Текст] / В. М. Язовских, В. Я. Беленький, Л. Н. Кротов, И. Ю. Летугин // Свароч. пр-во. – 1997. – № 4. – С. 18–20.
17. Модернізація електромеханічної частини привода подачі електроерозійного верстата для розмірної обробки дугою. [Текст]: звіт про НДР / КНТУ, керів. Ю. О. Єрмолаєв. – № держреєстрації 0111U007656. – Кіровоград, 2011. – 34 с.
18. Єрмолаєв, Ю. О. Розробка САУ електромеханічного привода верстата типу “ДУГА” на базі “ЭШИМ-1” [Текст] / Ю. О. Єрмолаєв, Г. В. Савеленко // Збірник наукових праць КНТУ. – 2004. – Вип. 15. – С. 270–273.
19. Савеленко, Г. В. Дослідження робочого процесу розмірної обробки дугою на верстаті з електромеханічним приводом [Текст] / Г. В. Савеленко, Ю. О. Єрмолаєв // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Науковий журнал. – 2014. – № 14. – С. 164–169.
20. Єрмолаєв, Ю. О. Дослідження САУ процесу РОД на верстаті з електромеханічним приводом. I. Основні фактори, що впливають на процес. [Текст] / Ю. О. Єрмолаєв, П. М. Великий, Г. В. Савеленко // Збірник наукових праць КНТУ. – 2007. – Вип. 19. – С. 270–273.
21. POR P. D. R. ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 225DMIPS, up to 2MB Flash/256+ 4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 20 comm. interfaces, camera & LCD-TFT [Електронний ресурс] / Режим доступа: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00071990.pdf> / – 10.04.2014 р. – Загол. з екрану.